

Sonderdruck aus
ZEITSCHRIFT FÜR
EXPERIMENTELLE UND ANGEWANDTE
PSYCHOLOGIE

Organ der Deutschen Gesellschaft für Psychologie

Heft 3 / Band XXXVIII

3. Quartal 1991

VERLAG FÜR PSYCHOLOGIE · DR. C. J. HOGREFE
GÖTTINGEN · TORONTO · ZÜRICH

Eine einfache Beschreibung von Farbadaptation beim Rot-Grün-System

Karl-Heinz Bäuml

Institut für Psychologie, Universität Regensburg

Das Verhalten des Rot-Grün-Systems bei Adaptation an Grün und an Magenta wird experimentell untersucht. Die theoretische Ausgangsbasis bilden die Grassmannschen Gesetze und eine lineare Gegenfarbentheorie. Diese zeichnet neben der Helligkeit die beiden Achsen Gelb-Blau und Grün-Magenta im Farbraum aus. Es wird ein Axiom zur Beschreibung von Farbadaptation beim Rot-Grün-System formuliert. Dabei wird zwei Paaren von Farbvektoren genau dann derselbe Rot-Grün-Anteil zugeordnet, wenn die Quotienten der jeweiligen Rot-Grün-Koordinaten von Testvektor und Adaptationsvektor identisch sind. Für beide Vektoren wird dabei eine Kontrolle der beiden anderen Gegenfarbensysteme vorausgesetzt. Das Axiom wird für vier Magenta- und vier Grünadaptationsvektoren geprüft. Drei Beobachter nehmen an dem Experiment teil. In zwei Vorversuchen werden für jeden Beobachter eine Ebene konstanter Helligkeit und seine individuellen Gegenfarbentlinien geschätzt. Die Daten sowohl für Magenta- als auch für Grünadaptation stimmen gut mit den theoretischen Vorhersagen überein. Damit ist das Axiom validiert. Farbadaptation läßt sich beim Rot-Grün-System sehr einfach beschreiben, falls die beiden anderen Gegenfarbensysteme kontrolliert sind.

1. Fragestellung

Fixiert man über längere Zeit einen grünlichen Farbreiz, so erscheint ein vorher weiß aussehender Farbreiz rötlich. Dies ist seit mehreren Jahrhunderten bekannt und bereits von Goethe (1810) beschrieben worden. Der Begriff Farbadaptation bezieht sich auf solche phänomenalen Veränderungen eines Farbreizes. Farbadaptation tritt nicht nur bei zeitlicher Umgebung auf. Die gleichzeitige Darbietung eines Farbreizes vor einem andersfarbigen Umfeld führt in etwa zu gleichen phänomenalen Veränderungen (Shevell, 1978). Farbadaptation verändert nicht nur die Erscheinung von Farben, sie führt auch zu Farberscheinungen, die ohne sie nicht gesehen werden kön-

nen. Ein Braun etwa läßt sich durch keinen spektralen Farbreiz oder irgendeine Komposition aus solchen herstellen. Fixiert man jedoch über längere Zeit ein achromatisches Licht großer Intensität, so sieht ein gelblicher Farbreiz bräunlich aus. Durch Adaptation lassen sich auch übersättigte Farberscheinungen erzeugen oder ein Schwarz, welches das eines lichtlosen Raums deutlich übersteigt (Heinemann, 1955).

Seit mehr als 100 Jahren strebt man nach einer theoretischen Beschreibung von Farbadaptation. Zahlreiche Experimente sind seitdem zur Farbadaptation durchgeführt worden. Trotzdem sind bis heute nur grob approximative theoretische Beschreibungen der Daten gelungen. Die bekanntesten Theorien stellen dabei wohl der v. Kriessche Koeffizientensatz (1905), die Zwei-Prozeß-Theorie von Jameson und Hurvich (1972) und affin lineare Transformationen (Burnham, Evans & Newhall, 1957, Krantz, 1968) dar. Nach v. Kries (1905) erschöpft sich die Wirkung eines farbigen Umfeldes in Sensitivitätsveränderungen der drei Photorezeptortypen. Die Sensitivitätsveränderung eines einzelnen Rezeptors bestimmt sich dabei allein durch das von diesem Rezeptor absorbierte Licht. Die lineare v. Kries-Theorie impliziert u. a. die empirische Gültigkeit der Unabhängigkeit der drei Rezeptortypen unter Adaptation und — wie alle linearen Theorien — die Proportionalitätsregel. Beide sind empirisch jedoch klar verletzt (vgl. Wyszecki & Stiles, 1982). Jameson und Hurvich (1972) schlagen eine Zwei-Prozeß-Theorie zur Beschreibung von Farbadaptation vor. Zusätzlich zu den Sensitivitätsveränderungen auf Rezeptorebene wird eine direkte Wirkung des Umfeldreizes auf das Farbsignal postuliert. Diese Wirkung wird als additiv angenommen und als nichtlinear angesetzt. Im allgemeinen wird durch die Zwei-Prozeß-Theorie eine gute Beschreibbarkeit der Wirkung von Farbadaptation erreicht. Die Theorie läßt jedoch keine expliziten Vorhersagen der Transformationen zu. Burnham, Evans und Newhall (1957) prüfen experimentell die Beschreibbarkeit von Farbadaptation als affin linearer Transformation. Danach läßt sich die Wirkung eines Umfeldreizes erst nach einer Nullpunktverschiebung im Farbraum (vgl. unten) durch eine Lineartransformation beschreiben. Die Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmungen zwischen den Vorhersagen und den Daten. Krantz (1968) präsentiert ein Axiomensystem zur Beschreibung von Farbadaptation als affin linearer Transformation.

In all diesen Experimenten werden haploskopische Versuchsanordnungen zur Prüfung der Theorien verwendet. In den beiden Augen eines Beobachters werden zwei unterschiedliche Adaptationszustände erzeugt. Der Beobachter gibt an, ob ein Farbreiz unter der Adaptationsbedingung im einen Auge gleich aussieht wie ein Farbreiz unter der Adaptationsbedingung im anderen Auge („cross-context matching“). Mit dieser Versuchsanordnung wird implizit von der Gültigkeit folgender beider Annahmen ausgegangen:

i. die beiden Augen eines Beobachters unterscheiden sich nicht; *ii.* es gibt keine durch die Adaptationszustände hervorgerufenen Interaktionen zwischen den beiden Augen. Während man erstere Annahme als Idealisierung akzeptieren mag, ist zweite Annahme problematisch. In mehreren Arbeiten (Shevell & Humanski, 1984, Humanski & Shevell, 1985; vgl. auch Krauskopf, Williams & Heeley, 1982, S. 1128) ist klar gezeigt worden, daß die Unabhängigkeit der beiden Augen empirisch *nicht* gilt: der Adaptationszustand im einen Auge beeinflußt die Farberscheinung des Testreizes im anderen Auge. Die Immunisierung von Annahme *ii.* bei empirischen Tests von Theorien ist somit nicht gerechtfertigt. Entsprechend könnten die gefundenen Nichtlinearitäten auch durch Interaktionen zwischen den beiden Augen bedingt sein.

Ein Ausweg aus dieser experimentellen Schwierigkeit bietet sich — zumindest für zwei Dimensionen im Farbraum — über eine Gegenfarbentheorie mit ihren Gleichgewichtsfarberscheinungen (Krantz, 1975 b; vgl. unten). Gleichgewichtsfarberscheinungen beziehen sich auf Farbtöne, wodurch die Theorien monokular prüfbar werden können. Wie Krantz (1975 b) zeigt, kann ein Gegenfarbensystem nur dann als linear betrachtet werden, falls seine Gleichgewichtsfarberscheinungen gewisse Abgeschlossenheitseigenschaften erfüllen. Erfüllen diese Gleichgewichtsfarberscheinungen unter Adaptation diese Abgeschlossenheitseigenschaften, so können sie analog unter Adaptation als linear betrachtet werden. Erweisen sich die Axiome unter beiden Bedingungen als empirisch gültig, so kann Farbadaptation für dieses System durch eine Lineartransformation beschrieben werden. Cicerone, Krantz und Larimer (1975) prüfen die Abgeschlossenheitseigenschaften unter Adaptation für die beiden chromatischen Heringschen Gegenfarbensysteme, das Rot-Grün-System und das Gelb-Blau-System. Wie unter neutraler Adaptation (Larimer, Krantz & Cicerone, 1974) erweisen sich die Axiome für das Rot-Grün-System als erfüllt. Cicerone et al. folgern, daß — zumindest für niedrige und mittlere Adaptationsintensitäten — Adaptation beim Rot-Grün-System linear ansetzbar ist. Das Gelb-Blau-System erweist sich weder bei neutraler (Larimer, Krantz & Cicerone, 1975) noch bei nichtneutraler Adaptation als linear. Walraven (1976) und Shevell (1978) prüfen detailliert das Verhalten des Rot-Grün-Systems unter spektraler Rotadaptation. Es ergeben sich systematische Verstöße gegen die Linearität. Farbadaptation kann somit auch für das Rot-Grün-System nicht generell als Lineartransformation angesetzt werden.

In der vorliegenden Untersuchung wird das Verhalten des Rot-Grün-Systems unter sehr speziellen Adaptationsbedingungen untersucht. Die Untersuchung basiert auf der Idee einer linearen, nicht-Heringschen Gegenfarbentheorie. Es wird das Verhalten eines isolierten Rot-Grün-Systems untersucht. D.h. Adaptation wird beim Rot-Grün-System für den Fall

untersucht, daß keine Farbanteile in bezug auf ein zweites chromatisches System vorliegen, die Helligkeit (drittes lineares Gegenfarbensystem) konstant gehalten wird und Testreiz und Adaptationsreiz identischen Farbton besitzen. Eine sehr einfache lineare Gesetzmäßigkeit zur theoretischen Beschreibung des Verhaltens wird postuliert. Diese wird für vier Grün- und vier Magenta-Adaptationsbedingungen experimentell geprüft.

2. Theorie

Unter einem *Farbreiz* versteht man elektromagnetische Strahlung, spektral zusammengesetzt aus Wellenlängen zwischen etwa 360 und 830 nm. Ein Farbreiz ist dabei vollständig spezifiziert durch die Angabe der Energie über all diese Wellenlängen. Betrachtet man obiges Intervall als kontinuierlich, so können Farbreize also als unendlich dimensionale Vektoren aufgefaßt werden. Unter einer *Farbe* (Farbvalenz) versteht man eine Klasse gleichaussehender Farbreize. D.h. kann ein Beobachter zwei (physikalisch) unterschiedliche, in angrenzenden Feldern präsentierte Farbreize nicht unterscheiden, so werden diese derselben Klasse von Farbreizen zugeordnet: sie besitzen dieselbe Farbe (z. B. LeGrand, 1968, Wyszecki & Stiles, 1982).

Wie Farbreize lassen sich auch Farben addieren und skalar transformieren (Grassmann, 1853; 3. und 2. Grassmannsches Gesetz). Während die Mannigfaltigkeit der Farbreize jedoch von unendlicher Dimensionalität ist, besitzt die der Farben für einen farbtüchtigen Beobachter nur die Dimension drei (1. Grassmannsches Gesetz). Diese drei Gesetzmäßigkeiten erlauben eine eindeutige geometrische Repräsentation der Farben in einem dreidimensionalen affinen Vektorraum. Sie gelten über einen sehr weiten Bereich und beginnen erst bei sehr niedrigen und extrem hohen Intensitäten zusammenzuberechnen. Eine meßtheoretische Formulierung der Grassmannschen Gesetze ist von Krantz (1975 a) vorgenommen worden. Ausgangsbasis der axiomatischen Formulierung der Grassmannschen Gesetze ist die physikalische Gesetzmäßigkeit der Beschreibbarkeit von Farbreizen und ihrer additiven (spektralen) Verknüpfung als kommutative Halbgruppe mit Aufhebungseigenschaft. Darauf läßt sich zudem in natürlicher Weise eine skalare Multiplikation definieren (Krantz, 1975 a, S. 287). A bezeichnet im folgenden eine Menge und wird als Menge der Farbreize interpretiert. Die Relation \oplus bezeichnet eine Funktion von $A \times A$ nach A und wird als additive Mischung von Licht interpretiert. Die Relation $*$ bezeichnet eine Funktion von $Re^+ \times A$ nach A und wird als multiplikative Intensitätsveränderung über alle Wellenlängen eines Farbreizes interpretiert. Die ersten beiden Axiome lauten dann:

A1. $< A, \oplus >$ ist eine kommutative Halbgruppe mit Aufhebungseigenschaft.

A2. $*$ ist eine skalare Multiplikation auf $< A, \oplus >$.

Diese beiden Axiome erlauben die geometrische Repräsentation der Menge der Farbreize in einem unendlich dimensional Vektorraum. Die Formulierung der Grassmannschen Gesetze liefern A3—A6. Dabei bezeichnet \sim eine zweistellige Relation auf A , wobei der Ausdruck $a \sim b$ zu interpretieren ist als „Farbreiz a sieht gleich aus wie Farbreiz b “.

A3. \sim ist eine Äquivalenzrelation auf A .

A4. Additive Invarianz: Für alle $a, b, c \in A$ gilt

$$a \sim b \text{ gdw. } a \oplus c \sim b \oplus c.$$

A5. Multiplikative Invarianz: Für alle $a, b \in A, t \in \mathbb{R}^+$ gilt

$$\text{wenn } a \sim b, \text{ dann } t * a \sim t * b.$$

A6. Trichromatizität:

- i. Für irgendwelche $a_0, a_1, a_2, a_3 \in A$ gibt es positive Zahlen $t_i, u_i, i = 0, 1, 2, 3$, so daß $t_i \neq u_i$ für wenigstens ein i , und $\sum_{i=0}^3 t_i * a_i \sim \sum_{i=0}^3 u_i * a_i$.
- ii. Ferner gibt es $a_1, a_2, a_3 \in A$, so daß für irgendwelche positive Zahlen $t_i, u_i, i = 1, 2, 3$ gilt: wenn $\sum_{i=1}^3 t_i * a_i \sim \sum_{i=1}^3 u_i * a_i$, dann ist $t_i = u_i$ für $i = 1, 2, 3$.

A3 expliziert die von Grassmann implizit verwendete Annahme, daß die gleichfarbig-Relation eine Äquivalenzrelation darstellt. A4 fordert die Erhaltung der Gleichfarbigkeit zweier Farbreize bei Hinzumischung eines gleichen dritten Farbreizes zu beiden (3. Grassmannsches Gesetz). A5 fordert die Erhaltung der Gleichfarbigkeit zweier Farbreize bei identischen multiplikativen Intensitätsveränderungen auf beiden Reizen (2. Grassmannsches Gesetz). A6 formuliert das 1. Grassmannsche Gesetz, das Trichromatizitätsprinzip. Die Axiome A1—A5 gewährleisten die homomorphe Abbildung der Menge der Farbreize in einen konvexen Kegel innerhalb eines Vektorraums. Dabei wird zwei Farbreizen genau dann derselbe Vektor zugeordnet, wenn sie gleichfarbig sind. Bei Wahl eines minimalen Vektorraums sind je zwei solche Repräsentationen isomorph zueinander. Die Repräsentation ist entsprechend nur eindeutig bis auf nichtsinguläre lineare Transformationen. Axiom A6 legt nur noch die Dimension des Vektorraums fest.

Eine Auszeichnung dreier phänomenaler Achsen läßt sich über die Formulierung einer linearen Gegenfarbentheorie erreichen. Hierfür gilt es zunächst, vier unterschiedliche Mengen B_j ($j = 1, 2, 3, 4$) von farbtongleichen

chromatischen Farbreizen auszuzeichnen. Für jede dieser Mengen ist dabei zu fordern, daß sie vollständig einen Farbton repräsentieren. D.h. für alle Elemente $a, b \in A$ gilt: wenn $a \in B_j$, dann $b \in B_j$ gdw. $a \sim_F b$, wobei \sim_F eine zweistellige Farbtongleichheitsrelation auf A darstellt. Für jede dieser vier Mengen werden die Abney-(Farbton-) und die Bezold-Brücke-Invarianz postuliert. Abney-Invarianz meint dabei die Forderung, daß der Farbton eines Farbreizes invariant bleibt gegenüber Hinzumischens weißen Lichts. Bezold-Brücke-Invarianz meint die Forderung, daß der Farbton eines Farbreizes invariant bleibt gegenüber Intensitätsveränderungen des Farbreizes. Zudem ist für die vier Mengen zu fordern, daß sich aus ihnen zwei Mengenpaare $(B_1, B_2), (B_3, B_4)$ so bilden lassen, daß für jedes Mengenpaar gilt, daß eine additive Mischung von Farbreizen dieser Mengen wiederum einer dieser Mengen angehört oder aber achromatisch ist; d.h. für ein Mengenpaar (B_1, B_2) etwa gilt: wenn $a \in B_1$ und $b \in B_2$, dann $a \oplus b$ entweder $\in B_1$ oder $\in B_2$ oder $\in W$, falls W die Menge der achromatischen Farbreize bezeichnet. Mit im wesentlichen diesen Forderungen sind zwei chromatische Achsen im Farbraum phänomenal auszeichnenbar (vgl. Bäuml, 1991). Die Axiome von Krantz (1976 b) können als Formalisierung dieser Idee aufgefaßt werden: A_1 bezeichne dabei die Menge der Farbreize mit den beiden Farbtönen des ersten Mengenpaares (plus der Menge der achromatischen Farbreize), d.h. $A_1 = B_1 \cup B_2 \cup W$; A_2 die Menge der Farbreize mit den beiden Farbtönen des zweiten Mengenpaares (plus der Menge der achromatischen Farbreize), d.h. $A_2 = B_3 \cup B_4 \cup W$.

- A7. Wenn $a \sim b$ und $a \in A_i$, dann $b \in A_i$ ($i = 1, 2$).
 A8. Additive und multiplikative Abgeschlossenheit:
 i. Wenn $a \in A_i$ und $t \in \mathbb{R}^+$, dann $t * a \in A_i$ ($i = 1, 2$);
 ii. Wenn $a \in A_i$, dann $b \in A_i$ gdw. $a \oplus b \in A_i$ ($i = 1, 2$).
 A9. Es gibt $a_1, b_1 \in A_2$ aber $\notin A_1$, so daß $a_1 \oplus b_1 \in A_1$, und es gibt $a_2, b_2 \in A_1$ aber $\notin A_2$, so daß $a_2 \oplus b_2 \in A_2$.

Diese Axiome erlauben zusammen mit den Axiomen A1—A6 eine homomorphe Abbildung der Menge der Farbreize in einen dreidimensionalen Vektorraum, in dem zwei Achsen ausgezeichnet und bis auf Ähnlichkeitstransformationen und $+/-$ -Orientierung festgelegt sind. Für eine vollständige Gegenfarbentheorie wird die Auszeichnung noch einer weiteren Achse, Helligkeit, gefordert (Krantz, 1975 b). Damit ist eindeutig ein Koordinatensystem im Farbraum ausgezeichnet. Im folgenden wird A_1 als die Menge der gelben, blauen und achromatischen Farbreize, A_2 als Menge der grünen, magentanen und achromatischen Farbreize interpretiert. Das erste chromatische System (φ_1) wird dabei über die Null-Linie Gelb-Blau konstruiert. Es kann als Rot-Grün-System interpretiert werden. Das zweite chromatische System (φ_2) wird über die Null-Linie Grün-Magenta konstruiert. Es kann

nicht als Gelb-Blau-System interpretiert werden. Die Abweichung von einem Gelb-Blau-System wirkt sich dabei vor allem im bläulich-rötlichen Bereich des Farbraums aus. Als drittes lineares System (φ_3) wird die Helligkeit ausgezeichnet. Damit liegt eine vollständige lineare Gegenfarbentheorie vor. Für die Linearität des Rot-Grün-Systems gibt es eine ganze Reihe von empirischen Hinweisen (z. B. Larimer et al., 1974, Suppes, Krantz, Luce & Tversky, 1989). Auch für die Linearität des zweiten chromatischen Systems gibt es gewisse Hinweise (z. B. Larimer et al., 1975, Purdy, 1931). Manche der Axiome sind hier jedoch noch nicht kritisch geprüft; dies betrifft vor allem die Abney-Invarianz von Magenta. Die Linearität der Helligkeit ist unter Zugrundelegung bestimmter Bedingungen ebenfalls annehmbar (Yellot, Wandell & Cornsweet, 1984).

Basierend auf dieser Gegenfarbentheorie wird ein Axiom zur Beschreibung von Farbadaptation beim Rot-Grün-System formuliert. Es ist auf dem Farbraum formuliert. Es wird für Situationen formuliert, in denen folgende drei Bedingungen gelten: *i.* Test- und Adaptationsvektor haben keine chromatischen Anteile in bezug auf das zweite chromatische System (φ_2 -Koordinaten gleich 0); *ii.* Test- und Adaptationsvektor besitzen jeweils gleiche Helligkeit (identische φ_3 -Koordinaten); *iii.* die Test- und Adaptationsvektoren besitzen gleichen (jedoch nicht achromatischen) Farbton (identisches φ_1 -Vorzeichen). Es wird eine zweistellige Relation \approx_i auf Paaren von Farbvektoren formuliert. Die Paare von Farbvektoren bestehen dabei jeweils aus einem Testvektor und einem Adaptationsvektor.

Axiom: Gegeben der durch die Gegenfarbenstruktur spezifizierte Farbraum Φ^3 .

Gegeben $a, b, u, v \in A$ mit $\varphi_2(a) = \varphi_2(b) = \varphi_2(u) = \varphi_2(v) = 0$ und $\varphi_3(a) = \varphi_3(u), \varphi_3(b) = \varphi_3(v)$. Ferner seien $\varphi_1(a), \varphi_1(b), \varphi_1(u), \varphi_1(v)$ alle > 0 oder alle < 0 . Dann gilt:

$$(\varphi(a), \varphi(u)) \approx_i (\varphi(b), \varphi(v)) \text{ gdw. } \frac{\varphi_1(a)}{\varphi_1(u)} = \frac{\varphi_1(b)}{\varphi_1(v)}. \quad (1)$$

Der Ausdruck $(\varphi(a), \varphi(u)) \approx_i (\varphi(b), \varphi(v))$ wird interpretiert als 'Testvektor $\varphi(a)$ unter Adaptationsvektor $\varphi(u)$ beinhaltet genausoviel Rot-Grün-Anteil wie Testvektor $\varphi(b)$ unter Adaptationsvektor $\varphi(v)$ '. Das Axiom drückt dann folgende empirische Hypothese aus: Zwei Vektorpaare $(\varphi(a), \varphi(u))$ und $(\varphi(b), \varphi(v))$ beinhalten genau dann denselben Rot-Grün-Anteil, wenn die Quotienten der jeweiligen Rot-Grün-Koordinaten von Testvektor und Adaptationsvektor identisch sind. Somit wird angenommen, daß Farbadaptation für das Rot-Grün-System unter Aufrechterhaltung der Grassmannschen Äquivalenzklassen beschreibbar ist. Interaktionen zwischen Testvektor und Adaptationsvektor werden ausgeschlossen, wie aus der

Quotientenrelation ersichtlich ist. Fixiert man die beiden Adaptationsvektoren, so ergibt sich mit dem Axiom für beliebige die Prämisse erfüllende Farbvektoren $\varphi(a)$, $\varphi(b)$ die Beziehung $\varphi_j(b) = k_j \varphi_j(a)$ ($j = 1, 2$) zwischen den Rot-Grün-Koordinaten der beiden Testvektoren; k_j ist dabei eine Konstante, die für positive und negative Koordinatenwerte unterschiedlich ausfallen kann. Die unter verschiedenen Adaptationsbedingungen bezüglich den Rot-Grün-Anteilen übereinstimmenden Testvektoren lassen sich also auf sehr einfache Weise bestimmen.

Im folgenden seien stets die Prämissen des Axioms vorausgesetzt. Die Relation \approx_i kann als in einem meßtheoretischen Sinn bedeutsame Relation (Suppes & Zinnes, 1963) aufgefaßt werden. Ihr Wahrheitswert ist invariant gegenüber den mit der Gegenfarbenstruktur zulässigen Skalentransformationen: Für zwei beliebige Repräsentationen φ , φ' gilt $\varphi'_i = a\varphi_i$, $a \neq 0$. Somit gilt: $(\varphi(a), \varphi(u)) \approx_i (\varphi(b), \varphi(v))$ gdw. $\varphi_i(a)/\varphi_i(u) = \varphi_i(b)/\varphi_i(v)$ gdw. $\varphi'_i(a)/\varphi'_i(u) = \varphi'_i(b)/\varphi'_i(v)$ gdw. $(\varphi'(a), \varphi'(u)) \approx_i (\varphi'(b), \varphi'(v))$. Damit ist die geforderte Invarianz gezeigt. Die Relation \approx_i beschreibt eine Äquivalenzklassenbildung auf Paaren von Farbvektoren. Aus dem Axiom folgt als zentrale Invarianzannahme $(\varphi(a), \varphi(u)) \approx_i (\lambda\varphi(a), \lambda\varphi(u))$: die Invarianz des Rot-Grün-Anteils eines Vektorpaares gegenüber identischen positiven multiplikativen Transformationen auf den beiden Vektoren. Diese Invarianz kann als Homogenitätsgesetz 0-ten Grades aufgefaßt werden (Aczél, 1966).

Unter Berücksichtigung der Prämisse impliziert das Axiom auf der Ebene der Farbreize die Homogenitätsbeziehung $(a, u) \approx_i (\lambda * a, \lambda * u)$; d. h. falls a und u beide grüne oder magentane Farbreize mit gleicher Helligkeit sind, so bleibt ihr Rot-Grün-Anteil bei identischen skalaren Intensitätsveränderungen auf beiden unverändert. Diese Beziehung bleibt auch aufrechterhalten, falls a und u durch andere Farbreize mit jedoch jeweils gleichen Rot-Grün-Koordinaten ersetzt werden. Dies entspricht der Forderung eines Persistenzsatzes für das Rot-Grün-System. Dieser ist hier jedoch eine logische Folgerung aus dem Persistenzsatz für die Grassmannsche Gleichfarbig-Relation, da die beiden anderen Koordinaten kontrolliert sind. Er bedingt somit keine weiteren Restriktionen. Diese Homogenitätsbeziehung scheint — wie auch das Axiom selbst — bisher in der Literatur noch nicht empirisch geprüft zu sein.

3. Methode

3.1. Versuchspersonen

An dem Experiment nehmen drei Versuchspersonen teil. Alle drei Versuchspersonen sind Psychologiestudenten. Sie nehmen jeweils an insgesamt 40 Sitzungen teil. Die ersten Sitzungen dienen dabei dem Vertrautwerden

mit der Experimentalanordnung und dem Erreichen eines gewissen — bei Farbwahrnehmungsexperimenten notwendigen — Trainingsniveaus. Die Experimente erstrecken sich für jeden Beobachter insgesamt etwa über sechs Wochen.

3.2. Generierung der Farbreize

Die Farbreize werden auf einem Farbmonitor (BARCO CDCT 51/3) generiert. Dieser ist an eine spezielle Graphikkarte (MATROX PIP 1024) angeschlossen und wird von einem Rechner aus gesteuert. Die erzeugbaren Farben entstehen dabei aus einer additiven Mischung der drei Bildschirmprimärfarben. Die Koordinaten dieser Bildschirmprimärfarben innerhalb des CIE-xy-Diagramms (Wyszecki & Stiles, 1982) lauten: Bildschirmrot $x = .634$, $y = .340$, Bildschirmgrün $x = .303$, $y = .613$, Bildschirmblau $x = .153$, $y = .061$. Die Farben werden über „Look-up“-Tabellen kontrolliert. Die den drei Bildschirmprimärfarben entsprechenden Farbkanäle des Monitors können unabhängig voneinander angesteuert werden. Der Bereich von minimaler zu maximaler Steuerspannung pro Farbkanal läßt sich dabei in 256 Stufen auflösen. Eine solche Auflösung reicht für eine subjektiv kontinuierliche Farbveränderung gut aus. Die Farbkanäle sind so normiert, daß sich bei gleichzeitiger Vollaussteuerung aller drei Kanäle ein genormtes Weiß ergibt, das in etwa dem Tageslicht eines hellen Sommertages entspricht und auch als D65 bezeichnet wird (Wyszecki & Stiles, 1982). Die Koordinaten der drei Farbkanäle werden als R-, G- und B-Koordinaten bezeichnet und liegen definitionsgemäß alle zwischen 0 und 1. Jeder Farbreiz kann also eindeutig mittels seiner RGB-Koordinaten beschrieben werden. Diese Koordinaten lassen sich mittels einer Lineartransformation in die üblicheren XYZ-Koordinaten des CIE-Systems umrechnen. Hier werden die Farbreize stets innerhalb des CIE-Koordinatensystems oder innerhalb individueller Gegenfarbenkoordinatensysteme beschrieben und nicht innerhalb des RGB-Koordinatensystems. Dieses wird nur programmintern zur Steuerung der Experimente verwendet (Bäumel, 1989).

3.3. Vorversuch zum Finden einer Fläche konstanter Helligkeit

Zur Kontrolle der Helligkeit der Farbreize gilt es innerhalb des Farbraums Flächen konstanter Helligkeit auszuzeichnen. Dabei wird Helligkeit nicht mit Leuchtdichte gleichgesetzt. Bei der Leuchtdichte handelt es sich um ein über viele Beobachter gemitteltes Maß mit beträchtlichen interindividuellen Schwankungen. Zudem wird mit der Leuchtdichte die Helligkeit kurzweiliger Farbreize unterschätzt (vgl. LeGrand, 1968). Mit den Ausfüh-

rungen von Yellot et al. (1984) wird von der Linearität der Helligkeit ausgegangen. Dies bedingt, daß Flächen konstanter Helligkeit Ebenen im Farbraum darstellen. Ebenen sind eindeutig durch drei Punkte festgelegt. Zum Auffinden einer bestimmten Ebene konstanter Helligkeit werden so nur die Leuchtdichtewerte dreier Farbreize benötigt, die gleich hell sind. Es wird ein Flimmerverschmelzungsexperiment durchgeführt. Als Standardreiz wird der innerhalb des CIE-xy-Diagramms festgelegte Weißpunkt ($x = 1/3$, $y = 1/3$) mit 25 cd/m^2 gewählt. Vergleichsreize bilden die drei Bildschirmprimärreize. Jeder der drei Vergleichsreize wird mit hoher Frequenz abwechselnd mit dem Standardreiz präsentiert, so daß der Eindruck einer flimmernden Farbe entsteht. Dieses Flimmern wird als bedingt durch die unterschiedlichen Helligkeiten der beiden Reize aufgefaßt (z. B. LeGrand, 1968). Durch Regelung der Leuchtdichte des Vergleichsreizes kann das Flimmern zum Verschwinden gebracht werden. Die Leuchtdichten der beiden Reize werden dann als gleich hell festgelegt. Es wird eine Herstellungsmethode verwendet. Die Reize werden während der Einstellzeit kontinuierlich präsentiert. 3 s nach dem Einstellen eines Reizes wird der nächste Reiz präsentiert. Die Reize sind scheibenförmig mit 6° Sehwinkel. Die Versuchssituation ist monokular. Vor Beginn des Experiments findet eine Dunkeladaptation von 7 min statt. Innerhalb einer Sitzung werden alle drei Vergleichsreize viermal in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Als Schätzwert für die Leuchtdichten gleicher Helligkeit jedes Beobachters wird das arithmetische Mittel der vier Einstellungen verwendet. Diese Daten werden dann sowohl für den zweiten Vorversuch als auch für das Hauptexperiment verwendet.

Tabelle 1 zeigt die für jeden Beobachter geschätzten Leuchtdichten für die Primärreize des Farbmonitors. Es zeigt sich für alle drei Beobachter im wesentlichen derselbe Befund. Für Bildschirmblau (B) wird im allgemeinen klar weniger Leuchtdichte benötigt als für Bildschirmweiß, damit beide gleich hell sind; für Bildschirmrot (R) und Bildschirmweiß fallen Leuchtdichte und Helligkeit nahezu zusammen; für Bildschirmgrün (G) ist etwas mehr Leuchtdichte erforderlich als für Bildschirmweiß, damit beide gleich hell sind. Wie erwartet, liegt die Ebene konstanter Helligkeit somit nicht parallel zu einer Ebene konstanter Leuchtdichte.

3.4. Vorversuch zum Finden der individuellen Gegenfarbenlinien

Zur Prüfung des Axioms wird eine möglichst genaue Kenntnis der chromatischen Gegenfarbenlinien der Beobachter benötigt. Wegen der möglichen interindividuellen Unterschiede werden die Schätzungen für die Beobachter individuell durchgeführt. Dies erfordert die Schätzung der Farbtonli-

Tabelle 1

Geschätzte Leuchtdichten für die drei Primärreize des Bildschirmmonitors (R, G, B), so daß sie gleich hell wie ein Bildschirmweiß mit einer Leuchtdichte von 25 cd/m^2 sind

Beob.	B	G	R
RA	21.877	25.661	24.211
MK	22.628	26.548	25.554
WO	24.031	26.894	25.518

nien der durch die Gegenfarbentheorie ausgezeichneten vier Gleichgewichtsfarben Gelb, Blau, Grün und Magenta. Es werden nur Schätzungen für Gelb, Grün und Blau durchgeführt. Auf die entsprechende Schätzung für Magenta wird verzichtet, da diese Aufgabe recht komplex und zeitaufwendig ist. Statt dessen wird eine Behelfslösung verwendet, indem mittels Extrapolation die Null-Linie für das zweite chromatische System alleine aus den Schätzungen für Grün bestimmt wird. Die Schätzung der Null-Linie für das Rot-Grün-System erfolgt aus den Schätzungen für Gelb und Blau.

Das Experiment findet für jeden Beobachter auf der im ersten Vorversuch geschätzten Ebene konstanter Helligkeit statt. Die Schätzung für Gelb und Blau erfolgt bei zwei Beobachtern (MK, WO) jeweils auf vier unterschiedlichen Sättigungsstufen, bei einem Beobachter (RA) jeweils auf nur einer Sättigungsstufe. Für Grün erfolgt die Schätzung für alle drei Beobachter auf jeweils zwei unterschiedlichen Sättigungsstufen. Der Beobachter hat dabei für Gelb und Blau zu entscheiden, ob die präsentierten Farbreize noch Rot- oder Grünteile beinhalten, für Grün, ob sie noch Gelb- oder Blauanteile beinhalten. Das Experiment wird unter Verwendung von Polarkoordinaten programmiert mit Nullpunkt ($x = 1/3$, $y = 1/3$) innerhalb des xy -Diagramms. Der Winkel stellt dabei in grober Näherung den Farbton dar, der Abstand vom Nullpunkt (Radius) in grober Näherung die Sättigung. Die jeweiligen Sättigungsstufen werden als Kreise um den Nullpunkt mit verschieden großen Abständen von diesem operationalisiert. Für eine bestimmte Gleichgewichtsfarbe bewegt sich der Beobachter mittels Tastenbetätigung dann in Abhängigkeit seiner Antworten auf diesen Kreisen. Dies ist gewährleistet durch den Umstand, daß alle vom Computer für diese Versuchssituation angebotenen Reize auf einem solchen Kreis liegen. Es wird das von Falmagne (1985) empfohlene adaptive Verfahren angewandt. Der Sehwinkel des Testreizes beträgt etwa 2° . Der Hintergrund ist dunkel. Die Versuchssituation ist monokular unter Verwendung desselben Auges wie im ersten Vorversuch. Es wird kein Fixationspunkt verwendet, so daß der Beobachter

zu Beginn der Reizpräsentation im allgemeinen eine Augenbewegung machen muß, um den Reiz zu fixieren. Dies ist jedoch problemlos (z. B. Larimer et al., 1974). Das Experiment beginnt mit 7 min Dunkeladaptation. Anschließend wird in periodischen Abständen jeweils für 1 s der Farbreiz präsentiert, gefolgt von 12 s Dunkelheit. 3 s vor Reizpräsentation kündigt ein akustisches Signal diesen an. Pro Sitzung werden Daten für nur eine Gleichgewichtsfarbe erhoben. Eine Sitzung dauert etwa 30 min. Der Beobachter wird vor jeder Sitzung über diese Gleichgewichtsfarbe informiert. Der Datenerhebung sind sechs bis acht Trainingssitzungen vorgeschaltet. Pro Sättigungsstufe werden wenigstens sechs Erhebungen gemacht.

Tabelle 2 beinhaltet die xy -Koordinaten der für jeden Beobachter geschätzten Gleichgewichtsfarben. Abbildung 1 zeigt die geschätzten xy -Werte für Gelb und Blau an einem Beobachter mit einer Geradenanpassung durch Kleinste-Quadrate-Methode. Für MK und WO läßt sich die Lage der Gelb- und Blaupunkte gut durch eine lineare Funktion beschreiben. Diese Daten stellen einen Test der Abney-Invarianz von Gelb und Blau und einen Test der additiven Abgeschlossenheit für Gelb und Blau dar. Beide werden bestätigt. Dies steht im Einklang mit den meisten Befunden hierzu in der Literatur (vgl. oben). Aus den Daten dieses Vorversuchs werden für jeden Beobachter über Kleinste-Quadrate-Schätzung die beiden individuellen Gegenfarbenlinien geschätzt.

Tabelle 2
Geschätzte xy -Koordinaten der Beobachter für Blau, Gelb und Grün

Beob.	Blau		Gelb		Grün	
	x	y	x	y	x	y
RA	0.220	0.295	0.368	0.427	0.270	0.398
					0.321	0.367
MK	0.219	0.221	0.385	0.407	0.323	0.443
	0.232	0.252	0.404	0.430	0.375	0.401
	0.253	0.274	0.422	0.454		
	0.274	0.296	0.443	0.476		
WO	0.239	0.204	0.399	0.395	0.224	0.327
	0.255	0.229	0.419	0.417	0.321	0.305
	0.273	0.254	0.440	0.439		
	0.289	0.280	0.459	0.462		

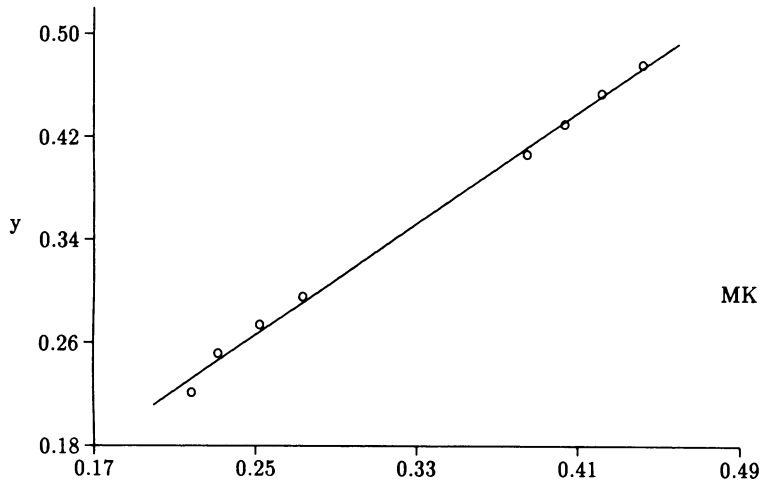


Abb. 1

Koordinatenpaare der Gleichgewichtsfarben für das Rot-Grün-System innerhalb des xy -Diagramms mit Geradenanpassung über Kleinste-Quadrate-Methode für Beobachter MK.

3.5. Experiment zur Prüfung des Axioms

Für jeden Beobachter wird folgende Normierung der chromatischen Achsen vorgenommen: Das gesättigste Magenta erhält den ϕ_1 -Wert 1, das gesättigste Gelb den ϕ_2 -Wert 1. Der Weißpunkt eines jeden Beobachters entspricht dem Schnittpunkt der beiden Achsen und hat die Koordinaten (0,0). Mit dieser Koordinierung können allen Vektoren im Farbraum eindeutig chromatische Gegenfarbenkoordinaten zugeordnet werden. Zur Isolierung des Rot-Grün-Systems wird im Farbraum auf der geschätzten Ebene konstanter Helligkeit eine Bewegung auf der Grün-Magenta-Achse vollzogen. Es wird für unterschiedliche Grün- und Magentaadaptationsvektoren die Lage des Gleichgewichtsvektors auf der Geraden Grün-Magenta geprüft. Das Axiom fordert, daß für diese Vektorpaare der Quotient aus den Rot-Grün-Koordinaten von Test- und Adaptationsvektor eine Konstante ist. Für jeden der beiden Farbtöne werden vier Adaptationsvektoren ausgewählt. Dabei besteht der erste aus dem Vektor mit dem für diesen Farbtönen maximalen Rot- bzw. Grün-Anteil (also z. B. für Magenta, wegen der Normierung, der Vektor mit dem ϕ_1 -Wert 1), der zweite aus dem Vektor mit $\frac{3}{4}$ dieses maximalen Farbanteils, der dritte aus dem Vektor mit der Hälfte und der vierte aus dem Vektor mit einem Viertel des maximalen Farbanteils. Die Ausprägungen auf der zweiten chromatischen Achse sind jeweils 0. Für jede dieser insgesamt acht Adaptationsbedingungen wird durch Bewegung auf

der Grün-Magenta-Achse ein Vektor gesucht, der in bezug auf das Rot-Grün-System im Gleichgewicht, d. h. weder rot noch grün ist. Der Ablauf des Experiments wird in den Gegenfarbenkoordinaten der Beobachter programmiert. Der Beobachter bewegt sich mittels Tastenbetätigung in Abhängigkeit seiner Antworten auf der Grün-Magenta-Achse. Dies wird dadurch gewährleistet, daß vom Computer nur Reize präsentiert werden, die auf dieser Geraden liegen. Es wird wiederum das adaptive Verfahren von Falmagne (1985) angewandt. Der Sehwinkel des Testreizes beträgt 2° , der des Adaptationsreizes 6° . Es wird kein Fixationspunkt verwendet, so daß der Beobachter zu Beginn der Testreizpräsentation im allgemeinen eine Augenbewegung machen muß, um diesen zu fixieren (z. B. Cicerone et al. 1975, Shevell, 1978). Der Hintergrund ist dunkel. Alle Beobachter verwenden wiederum dasselbe Auge wie in den beiden Vorversuchen. Das Experiment beginnt mit 7 min Dunkeladaptation und anschließenden 7 min Farbadaptation. Nach diesen 14 min wird die Adaptation für 1 s unterbrochen. Während dieser Zeit wird der Testreiz präsentiert. Danach erscheint sofort wieder der Adaptationsreiz für 20 s. Das Experiment läuft in einem solchen 21-s-Zyklus fort: 20 s Adaptation gefolgt von 1 s Testreizpräsentation. Jeweils 3 s vor Präsentation des Testreizes kündigt ein akustisches Signal diesen an. In jeder Sitzung wird nur ein Adaptationsreiz verwendet. Es werden zwei verschachtelte adaptive Verfahren durchlaufen, die sich im gegensätzlichen Rot-Grün-Anteil des ersten Testreizes unterscheiden. Eine Sitzung dauert etwa 30 min. Die Versuchspersonen führen das Experiment zuerst für Magenta und anschließend für Grün durch. Sie praktizieren vor beiden Bedingungen jeweils zwei Trainingssitzungen. Für jede der Adaptationsbedingungen werden wenigstens vier Erhebungen gemacht, so daß für jeden Beobachter wenigstens 16 Sitzungen resultieren. Die Schätzungen aus den einzelnen adaptiven Verfahren werden über die einzelnen Erhebungen arithmetisch gemittelt. Die Programme zur Versuchssteuerung werden unter Verwendung der Bibliothek PXL (Irtel, 1989) erstellt.

4. Ergebnisse

Tabelle 3 beinhaltet die Rot-Grün-Koordinaten der Test- und Adaptationsvektoren, die für die drei Beobachter unter Magenta- bzw. Grünadaptation weder rot noch grün erscheinen. Die Koordinierung ist in den individuellen Gegenfarbensystemen der Beobachter vorgenommen. Unter neutraler Adaptation stellt der Testvektor mit der ϕ_1 -Koordinate 0 den Gleichgewichtsvektor dar. Unter Adaptation zeigen sich teilweise drastische Verschiebungen des Gleichgewichtsvektors für beide Adaptationsfarbtöne. Diese Verschiebungen erfolgen in der erwarteten Richtung: der Gleichge-

Tabelle 3

Koordinatenpaare, die unter Magenta- und Grünadaptation im Gleichgewicht sind (AV: Koordinate des Adaptationsvektors, TV: Koordinate des Testvektors; Angabe in den φ_1 -Koordinaten der einzelnen Beobachter)

Beob.	Magenta		Grün	
	AV	TV	AV	TV
RA	1.000	0.907	-0.583	-0.503
	0.750	0.661	-0.438	-0.379
	0.500	0.445	-0.291	-0.255
	0.250	0.226	-0.146	-0.120
MK	1.000	0.812	-0.707	-0.604
	0.750	0.609	-0.531	-0.439
	0.500	0.404	-0.354	-0.296
	0.250	0.244	-0.177	-0.131
WO	1.000	0.797	-0.536	-0.450
	0.750	0.571	-0.402	-0.376
	0.500	0.378	-0.268	-0.261
	0.250	0.195	-0.134	-0.131

wichtsvektor verändert seine Lage in Richtung des Adaptationsvektors. Dabei erweist sich die Verschiebung als um so stärker, je größer der (absolute) Koordinatenwert des Adaptationsvektors ist. Für den größten Magentaadaptationskoordinatenwert (φ_1 -Koordinate 1) etwa verändert der Gleichgewichtsvektor bei zwei Beobachtern (WO, MK) seine Position von der Rot-Grün-Koordinate 0 bis etwa zur Rot-Grün-Koordinate .80, bei einem Beobachter (RA) bis etwa .91. Der frühere Magenta-bereich von 0 bis .80 bzw. .91 ist nun grün, während der Magenta-bereich unter dieser Adaptationsbedingung erst ab diesen Koordinaten beginnt und somit ganz erheblich verringert ist. Entsprechendes gilt für den größten Grünadaptationskoordinatenwert. Bei WO und RA ergibt sich eine Verschiebung des Gleichgewichtsvektors von der Rot-Grün-Koordinate 0 bis etwa -.50, bei MK bis -.60. Dies bedingt eine Erweiterung des Magenta-bereichs bis zum Koordinatenwert -.50 bzw. -.60. Der Grünbereich beginnt erst ab diesen Koordinaten. Es zeigen sich für alle drei Beobachter im wesentlichen dieselben Charakteristika.

Abbildung 2 zeigt graphisch die Abhängigkeit der Rot-Grün-Koordinaten der Gleichgewichtsvektoren von den Rot-Grün-Koordinaten der Adaptationsvektoren für Magenta- und Grünadaptation für zwei Beobachter. So

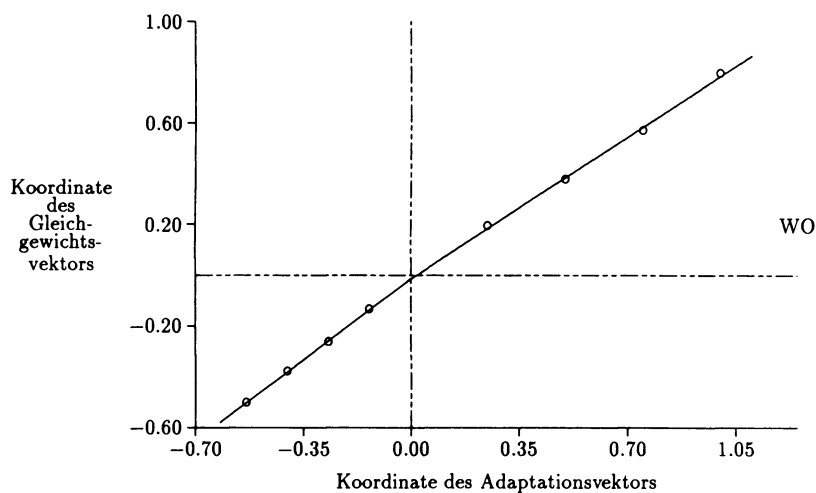


Abb. 2a

Abhängigkeit der Koordinate der Gleichgewichts(test-)vektoren von den Adaptationsvektoren bei *Magenta*- und *Grün*adaptation mit angepaßter linearer Funktion für Beobachter WO.

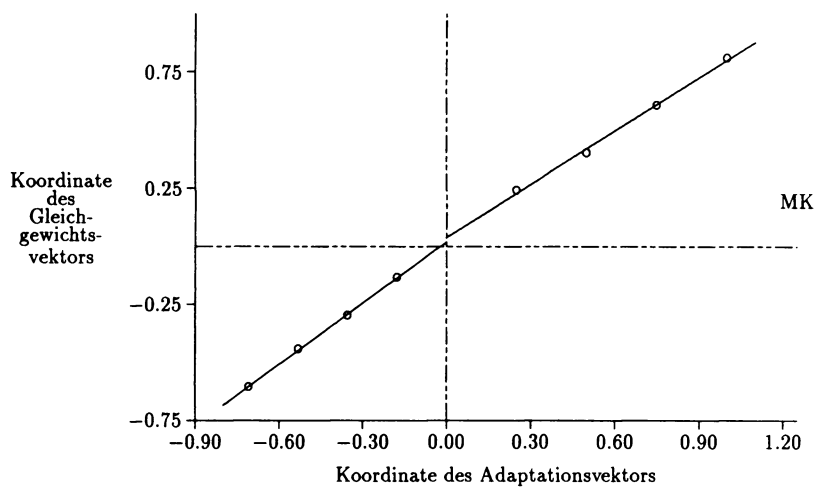


Abb. 2b

Abhängigkeit der Koordinate der Gleichgewichts(test-)vektoren von den Adaptationsvektoren bei *Magenta*- und *Grün*adaptation mit angepaßter linearer Funktion für Beobachter MK.

wohl für Magenta als auch für Grün können die Koordinatenpaare aller drei Beobachter durch lineare Funktionen beschrieben werden. Die linearen Funktionen gehen für die Beobachter RA und WO nahezu perfekt durch den Ursprung des Koordinatensystems und demonstrieren so die multiplikative Invarianz. Bei Beobachter MK zeigen sich sowohl für Magenta- als auch für Grünadaptation leichte Verschiebungen der Schnittpunkte der Geraden mit der Testvektorkoordinatenachse und somit leichte Verstöße gegen die multiplikative Invarianz. Es ergeben sich sehr geringe Standardabweichungen, die auf die Reliabilität der Daten hinweisen. Deren Größe ist jedoch durch die — nichteuklidische — Metrik des Farbraums mitbestimmt, was einen direkten Vergleich der einzelnen Standardabweichungen erschwert. Zudem kann hierfür nicht einfach die Metrik des Farbraums unter neutraler Adaptation übernommen werden.

Bei zwei der drei Beobachter (MK, WO) zeigt sich ein etwas stärkerer Anstieg der Geraden für Grünadaptation als für Magentaadaptation (Tab. 4). Der Gleichgewichtsvektor erfährt unter Grünadaptation somit eine stärkere Verschiebung als unter Magentaadaptation. Bei RA sind die Steigungen nahezu gleich.

Tabelle 4

Geradengleichungen für den funktionalen Zusammenhang zwischen den Koordinaten der Test- und Adaptationsvektoren für das Rot-Grün-System bei Magenta- und Grünadaptation: $\varphi_{1T} = a + b\varphi_{1A}$ (T: Testvektor, A: Adaptationsvektor)

Beob.	Magenta		Grün	
	a	b	a	b
RA	-.005	.904	.003	.871
MK	.040	.764	.023	.882
WO	-0.014	.799	-.012	.911

5. Diskussion

Es wird die Lage des Gleichgewichtsvektors beim Rot-Grün-System für Grün- und Magentaadaptation untersucht. Unter Zugrundelegung einer linearen Gegenfarbentheorie sind die Helligkeit und die Farbanteile des zweiten chromatischen Systems dabei kontrolliert. Adaptation sowohl an Magenta als auch an Grün führt zu starken Verschiebungen des Gleichge-

wichtsvektors in Richtung des Adaptationsvektors. Die funktionale Abhängigkeit der Rot-Grün-Koordinate des Gleichgewichtsvektors von der des Adaptationsvektors läßt sich dabei zumindest approximativ durch eine Gerade durch den Ursprung dieses Koordinatensystems beschreiben. Mit dieser multiplikativen Invarianz ist das Axiom validiert. Unter der Prämisse des Axioms kann Farbadaptation für das Rot-Grün-System durch eine einfache Relativierung der Rot-Grün-Koordinate des Testvektors durch die des Adaptationsvektors beschrieben werden. Dies führt zur Beschreibung von Farbadaptation durch eine Lineartransformation mit nur einem Koeffizienten. Die Daten lassen dabei kaum Platz für Alternativtheorien. Gemäß den Zwei-Prozeß-Theorien etwa erfordert die Beschreibung von Farbadaptation neben einem linearen Teil auch noch einen induktiven, nichtlinearen Term. Eine Zwei-Prozeß-Theorie würde zumindest eine Verschiebung der Gerade bei Grünadaptation in den negativen Bereich der Koordinatenachse und für Magenta in den positiven Bereich der Koordinatenachse vorhersagen. Darüber hinaus sollte der funktionale Zusammenhang wohl nichtlinear sein. Bei keinem Beobachter ist etwas Derartiges in den Daten erkennbar. Mit diesen Daten werden auch die aus dem Axiom folgenden Gesetzmäßigkeiten auf der Ebene der Farbreize bekräftigt. Die Daten stützen also für das Rot-Grün-System vor allem die multiplikative Invarianz für Farbreizpaare.

Cicerone et al. (1975) finden für Grünadaptation eine lineare Beschreibbarkeit von Adaptation für das Rot-Grün-System. Dieser Befund wird mit den vorliegenden Daten erhärtet. Er wird jedoch noch weitergeführt. Zumindest unter den hier verwendeten Bedingungen (vgl. unten) läßt sich die Lineartransformation auf sehr einfache Weise festlegen. Sie ist durch einen einzigen, genau festgelegten Koeffizienten bestimmt. Die Ergebnisse legen ferner eine Verallgemeinerung dieser Befunde für Grünadaptation auf Magentaadaptation nahe. Auch unter Magenta scheint Farbadaptation für das Rot-Grün-System sehr einfach linear beschreibbar. Die theoretische Begründung für die beiden Adaptationsbedingungen wird durch die formulierte lineare Gegenfarbentheorie geleistet, die durch die vorliegenden Daten ebenfalls gestützt wird. Diese Befunde stehen nicht in Widerspruch zu den Daten von Walraven (1976) oder Shevell (1978), die Nichtlinearitäten beim Rot-Grün-System finden. Diese verwenden Adaptationsbedingungen, bei denen keine Kontrolle der hier definierten Gegenfarbensysteme vorliegt. Möglicherweise sind Nichtlinearitäten eben durch Interaktionen zwischen diesen drei Gegenfarbensystemen bedingt.

Die Daten legen die Gültigkeit der multiplikativen Invarianz für Farbreizpaare nahe. Interessanterweise läßt sich diese Invarianz über weite Bereiche auch für Helligkeit demonstrieren. Die Daten von Heinemann (1955) stützen die Invarianz für achromatische Reizpaare. Bäuml (1991) präsentiert Daten, die das Axiom und somit auch die multiplikative Invarianz für das

dritte linear angesetzte Gegenfarbensystem stützen. Nimmt man all diese Befunde zusammen, so weisen diese auf die Existenz dreier linearer Gegenfarbensysteme hin, die sich im isolierten Zustand bei Adaptation linear verhalten. Die theoretische Beschreibung wird dabei durch die präsentierte lineare Gegenfarbentheorie und das Axiom geleistet.

Mit der Prämisse des Axioms wird implizit davon ausgegangen, daß die im Axiom formulierte numerische Beziehung bei Vorliegen von Farbanteilen in bezug auf das zweite chromatische System verletzt sein könnte. Dies scheint mit den Befunden von Walraven (1976) und Shevell (1978) möglich. Sie alle finden eine Nichtlinearität bei Adaptation an ein spektrales Rot. Trotzdem bieten sich mit den existierenden Daten diverse Möglichkeiten für eine Erweiterung des Gültigkeitsbereiches des Axioms an: *i.* eine erste natürliche Erweiterung ist die Abschwächung der Nullkoordinierung der Vektoren bezüglich des zweiten Gegenfarbensystems auf die Forderung jeweils identischer Koordinaten für Test- und Adaptationsvektor; genau diese Restriktion ist ja auch für Helligkeit gefordert; *ii.* eine zweite Erweiterung bestünde in der Forderung, daß beide Testvektoren in bezug auf das zweite chromatische System identische Koordinaten aufweisen, und nicht notwendigerweise nullkoordiniert sind; ist diese Forderung außer im Falle der Nullkoordinierung nur in einem weiteren Fall erfüllt, so folgt ihre Gültigkeit wegen der Linearität (Cicerone et al., 1975) auch für alle anderen Fälle mit konstanten Koordinaten; *iii.* auf letzterer Erweiterung aufbauend, ließe sich der Gültigkeitsbereich noch stärker verallgemeinern durch die Forderung eines Persistenzsatzes für das Rot-Grün-System bei Grün- und Magentaadaptation; ob diese sehr starke Forderung erfüllt ist, ist mit den existierenden Daten unklar.

Es zeigt sich noch ein weiteres interessantes Ergebnis in den Experimenten. Die Daten geben einen tendentiellen Hinweis darauf, daß sich das Rot-Grün-System unter Adaptation in zwei Teilsysteme zerlegt, die sich nicht völlig identisch verhalten. Die Zerlegung erfolgt durch die Null-Linie des Systems unter neutraler Adaptation. Dabei weisen die Daten auf eine etwas stärkere Adaptationswirkung für Grün als für Magenta hin. Dieser Befund könnte auf einem Reihenfolgeeffekt bei der Datenerhebung beruhen, zumal alle drei Beobachter die Experimente mit Magenta beginnen. Der Befund erhält jedoch eine gewisse Bekräftigung durch Daten von Krauskopf, Williams und Heeley (1982). Diese finden eine höhere Schwellenerhöhung für Grün als für Rot bei jeweils identischer Adaptation. Damit wird auf die Möglichkeit unterschiedlich starker Wirkungen von Adaptation für die beiden farbtönmäßig unterschiedlichen Farbanteile des Systems hingewiesen, bei jedoch gleichzeitiger Gültigkeit des Axioms.

Die Daten aus den Vorversuchen und dem Hauptexperiment demonstrieren deutliche interindividuelle Unterschiede. Dies zeigt sich sowohl in der

Lage der beiden Gegenfarbenlinien als auch in der Stärke der Adaptationswirkungen. Dieser Befund ist nicht neu. Beträchtliche individuelle Unterschiede zeigen sich auch in den Experimenten von Cicerone et al. (1975). Glücklicherweise wirken sich diese jedoch nicht auf die jeweils untersuchten Gesetzmäßigkeiten aus. Wie bei Cicerone et al. etwa trotzdem die Daten aller Beobachter linear beschreibbar sind, erfüllen in den vorliegenden Experimenten trotzdem die Daten aller Beobachter das Axiom bzw. die Gegenfarbenaxiome. D.h. die interindividuellen Unterschiede scheinen sich nicht auf die dem Verhalten zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten auszuwirken, wodurch die Daten aller Beobachter identisch theoretisch beschreibbar werden.

Farbadaptationstheorien können wertvolle Hilfe leisten zur Formulierung von Farbkonstanztheorien. So etwa unterliegt der Farbkonstanztheorie von Land (1964) als eine zentrale Annahme die v. Kries-Theorie. Danne Miller (1989) zeigt, daß auch neueren theoretischen Entwicklungen im Bereich der Farbkonstanz Adaptationstheorien zugrundeliegen. Dabei werden häufig Adaptationen auf zwei Stufen angesetzt, auf einer retinalen Stufe (v. Kries-Satz) und zusätzlich auf einer Gegenfarbenstufe. Ein analoger Ansatz findet sich auch bei Worthey (1985). Möglicherweise kann das vorliegende Axiom zur Klärung von Farbkonstanzmechanismen einen Beitrag leisten. Dies wird jedoch erst nach weiteren experimentellen und theoretischen Arbeiten klarer werden.

Summary

The red/green-system is examined experimentally under adaptation to green and to magenta. The theoretical basis consists of Grassmann's laws and of a new linear opponent colors theory. Besides brightness, this opponent colors theory specifies the two chromatic axes yellow-blue and green-magenta within color space. An axiom is formulated for the description of color adaptation for the red/green-system. Two pairs of color vectors are assumed to be equivalent with respect to the red/green-system if the quotients of the respective red/green-coordinates of test vector and adaptation vector are identical. For both vectors the control of the other two opponent colors systems is presupposed. The axiom is tested for four green and four magenta adaptation vectors. Three observers take part in the experiment. For each observer an individual plane of constant brightness and his or her individual opponent colors axes are estimated experimentally. For both magenta and green adaptation the data agree well with the theoretical predictions. Thus they provide empirical support for the axiom. For the red/green-system color adaptation can be described very simply if the other two opponent colors systems are controlled.

Literatur

- Aczél, J. (1966). *Lectures on functional equations and their applications*. New York: Academic Press.
- Bäuml, K.-H. (1989). *Eine theoretische und experimentelle Untersuchung der Farbadaptation*. Unveröffentlichte Dissertationsarbeit. Universität Regensburg.
- Bäuml, K.-H. (1991). Farbadaptation bei einem Gelblich-Bläulich-System: Prüfung einer einfachen numerischen Beziehung. *Zeitschrift für Psychologie* (in Druck).
- Burnham, R. W., Evans, R. M. & Newhall, S. M. (1957). Prediction of color appearance with different adaptation illuminations. *Journal of the Optical Society of America*, 47, 35—42.
- Cicerone, C. M., Krantz, D. H. & Larimer, J. (1975). Opponent-Process Additivity — III. Effect of moderate Chromatic Adaptation. *Vision Research*, 15, 1125—1135.
- Dannemiller, J. L. (1989). Computational approaches to color constancy: Adaptive and ontogenetic considerations. *Psychological Review*, 96, 255—266.
- Falmagne, J.-C. (1985). *Elements of psychophysical theory*. New York: Oxford University Press.
- Goethe, J. W. (1810). *Zur Farbenlehre*. Tübingen.
- Grassmann, H. (1853). Zur Theorie der Farbenmischung. *Poggendorffs Ann. Physik*, 89, 69—84.
- Heinemann, E. G. (1955). Simultaneous brightness induction as a function of inducing- and test-field luminance. *Journal of Experimental Psychology*, 50, 89—96.
- Humanski, R. A. & Shevell, S. K. (1985). Color perception with binocularly fused adaptive fields of different wavelength. *Vision Research*, 25, 1923—1935.
- Irtel, H. (1989): Eine Bibliothek zur Steuerung psychologischer Experimente. *Poster auf der 31. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Bamberg*.
- Jameson, D. & Hurvich, L. M. (1972). Color adaptation: sensitivity, contrast, after-images. In D. Jameson & L. M. Hurvich (Eds.), *Handbook of sensory physiology*, Vol. VII/4: *Visual Psychophysics*. New York: Springer-Verlag.
- Krantz, D. H. (1968). A theory of context effects based on cross-context matching. *Journal of Mathematical Psychology*, 5, 1—48.
- Krantz, D. H. (1975 a). Color measurement and color theory: I. Representation theorem for Grassmann structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 12, 283—303.
- Krantz, D. H. (1975 b). Color measurement and color theory: II. Opponent-colors theory. *Journal of Mathematical Psychology*, 12, 304—327.
- Krauskopf, J., Williams, D. R. & Heeley, D. W. (1982). Cardinal directions of color space. *Vision Research*, 22, 1123—1131.
- Land, E. H. (1964). The retinex. *American Scientist*, 52, 247—264.
- Larimer, J., Krantz, D. H. & Cicerone, C. C. (1974). Opponent process additivity — I. Red/green equilibria. *Vision Research*, 14, 1127—1140.
- Larimer, J., Krantz, D. H. & Cicerone, C. C. (1975). Opponent process additivity — II. Yellow/blue equilibria and nonlinear models. *Vision Research*, 15, 723—731.
- LeGrand, Y. (1968). *Light, colour and vision*. London: Chapman & Hall.
- Purdy, D. M. (1931). Spectral hue as a function of intensity. *Am. J. Psychol.*, 49, 313—315.
- Shevell, S. K. (1978). The dual role of chromatic backgrounds in color perception. *Vision Research*, 18, 1649—1661.
- Shevell, S. K. & Humanski, R. A. (1984). Color perception under contralateral and binocularly fused chromatic adaptation. *Vision Research*, 24, 1011—1019.
- Suppes, P., Krantz, D. H., Luce, R. D. & Tversky, A. (1989). *Foundations of measurement*, Vol. II. San Diego: Academic Press.
- Suppes, P. & Zinnes, J. L. (1963). Basic measurement theory. In R. D. Luce, R. R. Bush & E. Galanter (Eds.), *Handbook of mathematical psychology*, Vol. 1. (S. 1—76). New York: Wiley.

- v. Kries, J. (1905). Die Gesichtsempfindungen. In W. Nagel (Hrsg.), *Handbuch der Physiologie des Menschen* (Vol. 3, S. 109—279). Braunschweig: Vieweg.
- Walraven, J. (1976). Discounting the background — the missing link in the explanation of chromatic adaptation. *Vision Research*, 16, 289—295.
- Worthey, J. (1985). Limitations of color constancy. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 1014—1026.
- Wyszecki, G. & Stiles, W. S. (1982). *Color science* (2nd ed). New York: Wiley.
- Yellot, J. I., Wandell, B. A. & Cornsweet, T. N. (1984). The beginning of visual perception: the retinal image and its initial coding. In I. Darian-Smith (Ed.), *Handbook of Physiology* (III, Part I). Bethesda: American Physiological Society.

Anschrift des Verfassers: Dr. Karl-Heinz Bäuml, Institut für Psychologie, Universität Regensburg, Universitätsstraße 31, 8400 Regensburg.